

선저고정형 소나의 탐지성능 향상을 위한 빔 안정화 빔형성 기법

Beam Stabilization Beamforming Technique
for Hull-Mounted Sonar Performance Enhancement

류 영 우*
Ryu, Young-Woo

ABSTRACT

Hull-Mounted Sonar(HMS) has been the main equipment to detect and track underwater threats like torpedoes and enemy submarines. The HMS has short warming-up time and is employable independently with sea-state and weather condition. But these bad environmental condition and ship maneuvering make ship's roll and pitch. Ship's roll and pitch make unstability of sensor position, then cause degradation of the HMS performance.

In this paper, we will show how the unstability influences the HMS performance, propose the 'Beam Stabilization Beamforming Technique' to overcome these phenomenon. And present the effectiveness of proposed technique by comparing with conventional beamforming result.

주요기술용어(주제어) : Hull-Mounted Sonar(선저고정형소나)

1. 머리말

선저고정형 소나는 수상함에서 어뢰나 적 잠수함과 같은 수중위협을 탐지/추적 및 식별하기 위해 사용하는 주요수단이다. 선저고정형 소나는 선저에 부착되어 있어 예인형 선배열소나, 헬기 디핑소나에 비하여 운용준비 시간이 짧으며, 해상상태나 기상상태와 무관하게 상시 운용가능하다는 장점이 있으나, 높은 해상상태 및 함의 기동에 의한 함정의 좌우 흔들림(roll)

과 위아래 흔들림(pitch)으로 인하여 센서배열의 위치 변화가 발생하여, 소나의 탐지성능이 저하될 우려가 있다.

타 탐지체계인 예인형 선배열 소나의 경우, 함기동에 의해 발생된 선배열의 비선형성을 보상하여 탐지성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되어 왔지만^{1,2}, 선저고정형 소나의 경우에는 그 연구 결과가 잘 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 함 운동으로 인한 롤(roll), 피치(pitch)에 의한 탐지 성능 저하에 대해 분석하고, 이러한 성능저하를 극복하기 위한 방안으로서 '빔 안정화 빔형성 기법'을 제안하고자 한다. 2장에서는 기존의 빔형성 기법^{3~5}과 적용 대상 장비인 교차배열 원통형 배열의 특성⁶, roll, pitch로 인한

† 2008년 4월 30일 접수~2008년 6월 5일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : ryuyw@add.re.kr

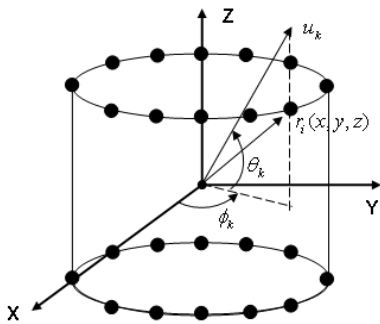
빔 특성 저하에 대하여, 3장에서는 제안된 빔 안정화 빔형성 기법에 대하여 상세하게 설명하고, 4장에서는 제안된 기법을 모의 데이터에 적용하여 기법 적용 전/후의 결과를 비교분석하여 성능향상 결과를 제시하고, 마지막으로 결론을 맺는다.

2. 기존의 빔형성 기법

수상함에 탑재된 선저고정형 소나는 소나배열을 구성하는 각 센서들의 수신신호들 간의 위상을 보상하여 합산함으로써 특정방위를 지향하는 빔을 형성하여 표적 탐지를 수행한다.

가. 원통형 배열의 빔형성

특정 방위를 지향하는 빔을 만들기 위해서는 각 센서에서 수신되는 신호들의 위상을 맞춰 합산하는 과정이 필요하다. 이를 위해 식 (1)과 같이 빔 방위벡터와 배열센서의 위치벡터의 내적을 통하여, 센서간의 시간지연을 구하고, 그 차이를 보상한다.



[그림 1] 원통형 배열의 구조

$$\tau_{k,i} = u_k \cdot r_i / c \quad (1)$$

$$u_k = [\cos\phi_k \cos\theta_k \quad \sin\phi_k \cos\theta_k \quad \sin\theta_k]^T \quad (2)$$

u_k 는 빔 방위벡터, r_i 는 센서위치벡터, c 는 음속, ϕ_k 는 빔의 수평방위, θ_k 는 빔의 수직방위이다.

k 번째 빔의 i 번째 센서에서의 시간 지연은 식 (3)과 같다.

$$\Delta t_{k,i} = (\tau_{\max} - \tau_{k,i}) f_s N \quad (3)$$

τ_{\max} 는 배열 중심에 대한 최대지연이며, f_s 는 표본화 주파수, N 은 보간 배수이다.

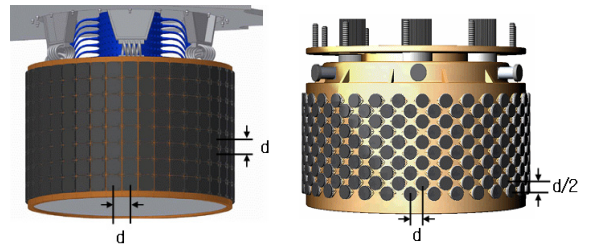
시간지연을 고려하여 합산한 k 번째 빔의 출력은 식 (4)와 같다.

$$F_k = \sum_{i=1}^M s_i(t + \Delta t_{k,i}) * w_i \quad (4)$$

M 은 빔형성시 사용된 센서의 수, $s_i(t + \Delta t_{k,i})$ 는 시간지연 처리된 센서신호, w_i 는 각 센서별 가중치이다.

나. 교차형 원통형 배열의 특성

소나의 성능은 배열을 구성하는 센서의 수에 비례하게 된다. 하지만 수상함의 소나배열의 크기가 제한되어있어, 정해진 수의 소나로 최적의 성능을 얻기 위한 센서배치 방안에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 직교배열과 교차배열에 대한 수평/수직 빔패턴 및 지향지수와 같은 성능 요소를 비교, 분석하였다. 직교배열과 교차배열에의 형태와 수직/수평 센서간격은 그림 2와 같다.



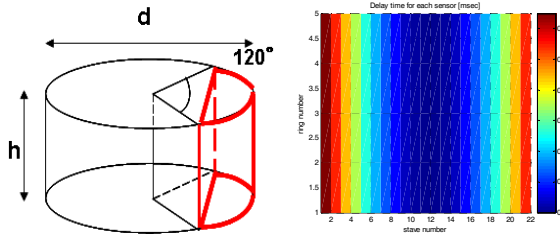
[그림 2] 직교배열과 교차배열

직교배열과 교차배열에 대한 빔 패턴 분석 시 사용된 센서는 빔의 지향 방위 $\pm 60^\circ$ 의 센서를 사용하였으며, 그 경우의 빔 지연 맵을 그림 3에 나타내었다. 가로축은 스테이브 번호 세로축은 링 번호를 의미하며, 지연시간을 컬러코드로 나타내었다.

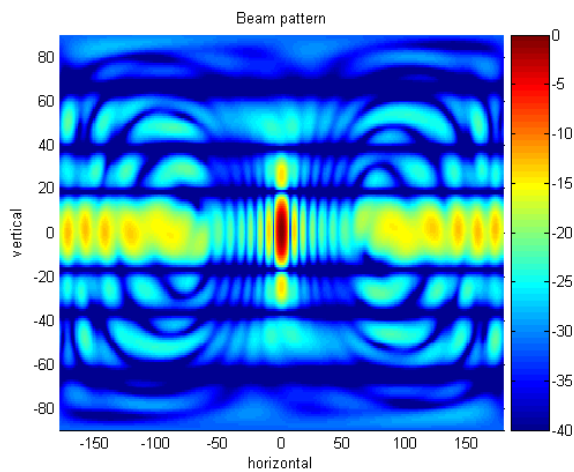
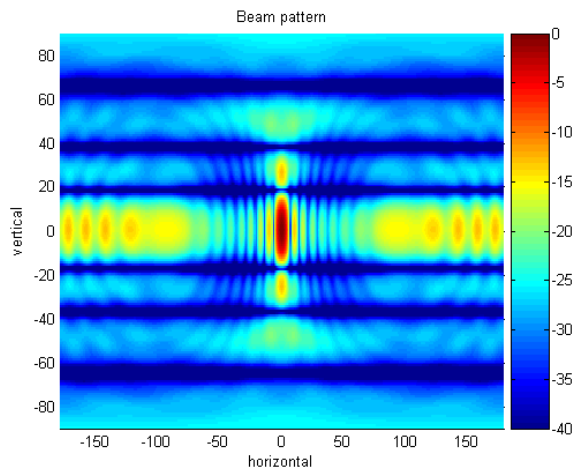
빔 특성 분석을 위해, 직교배열과 교차배열에 대하여 수평방위 $-180^\circ \sim 180^\circ$, 수직방위 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 에 대한

빔 패턴을 그림 4에, 빔 중심에서의 수평 빔 패턴과 수직 빔 패턴을 그림 5에 나타내었다.

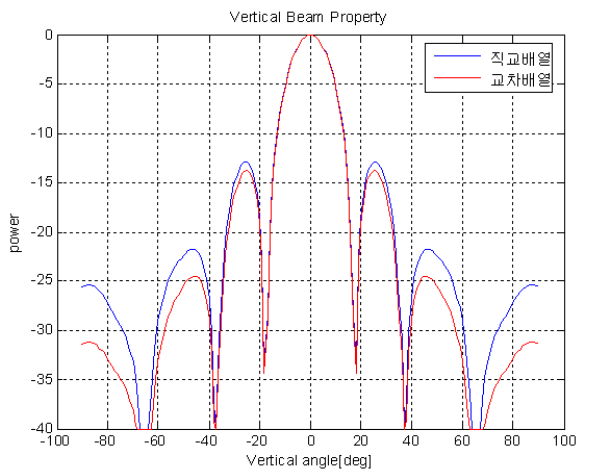
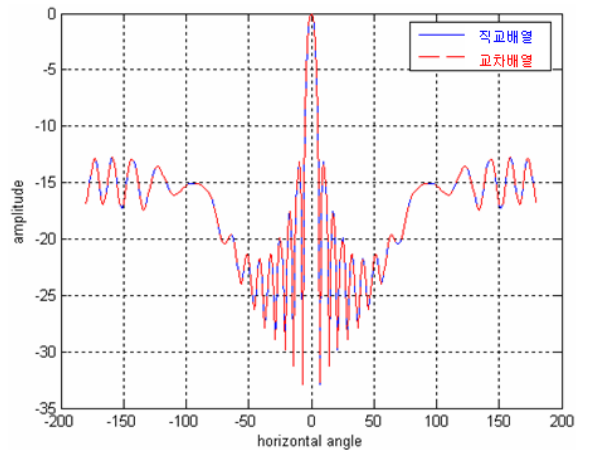
두 배열의 정량적인 성능비교를 위해, 빔 특성을 분석하여, 표 1에 나타내었다.



[그림 3] (좌) 사용 센서 범위 (우) 지연 맵



[그림 4] 빔 패턴 (상) 직교배열 (하) 교차배열



[그림 5] (상) 수평 빔패턴 (하) 수직 빔패턴

[표 1] 직교배열과 교차배열의 빔 특성 분석

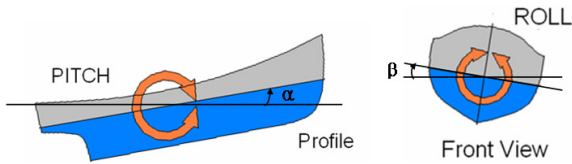
	직교배열	교차배열
수평 빔폭	6.1°	6.1°
수평 부엽준위	-13.2°	-13.2°
수직 빔폭	15.6°	15.4°
수직 부엽준위	-12.9dB	-13.8dB
DI(지향지수)	23.4dB	23.7dB

수평 빔의 경우, 빔폭과 부엽준위 모두 두 배열에서 동일한 값을 나타내었다. 그러나 수직빔의 경우 교차배열에서 빔폭은 0.2도 좁게, 부엽준위는 0.9dB 낮

게, 지향지수도 교차배열에서 0.3dB 높게 나타나 교차배열이 더 우수한 센서배치임을 확인할 수 있었다.

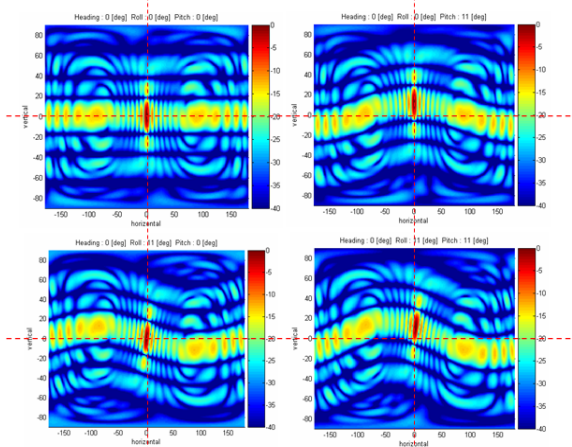
다. Roll, pitch로 인한 빔 특성 저하

수상함은 높은 해상상태와 함 기동과 같은 요인들로 인하여, 함정의 roll과 pitch가 발생하여, 배열센서의 절대 위치가 변경된다. 이로 인해 빔형성시 지향방위가 변동됨에 따라 탐지 성능이 저하된다.



[그림 6] 수상함의 roll, pitch

Roll, pitch에 의한 빔 특성 변화를 살펴보기 위해 함정의 roll, pitch가 없는 경우, roll 11°의 경우, pitch 11°의 경우, roll, pitch 각각 11°의 경우에 대하여 빔패턴을 분석하여 그림 7에 나타내었다.



[그림 7] Roll, pitch에 의한 빔특성 변화
(좌상) roll 0° pitch 0° (우상) roll 0° pitch 11°
(좌하) roll 11° pitch 0° (우하) roll 11° pitch 11°

시뮬레이션 분석 결과, 함수 방향 빔의 경우 pitch에 의해 빔이 상/하로 움직이는 현상이, roll에 의해 빔이 좌/우로 기울어지는 현상이 발생하였으며, 그 결

과 지향방위의 신호크기 감소 및 지향방위 변동이 발생함을 확인할 수 있었다. 상세한 빔 특성 변화는 표 2에 나타내었다.

[표 2] Roll, pitch에 빔 특성 변화

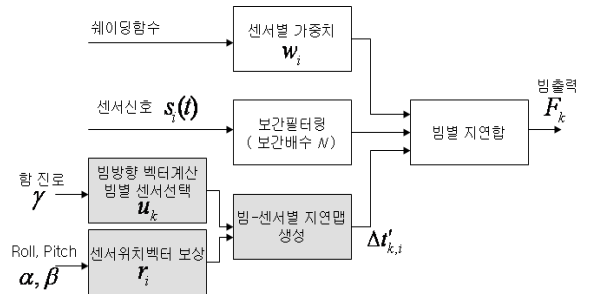
[Roll, Pitch]	[0°, 0°]	[0°, 11°]	[11°, 0°]	[11°, 11°]
지향방위 신호크기	0dB	-6.6dB	0dB	-6.6dB
지향방위 변동 (수평, 수직)	[0°, 0°]	[0°, 11°]	[0°, 0°]	[2°, 11°]

3. 빔 안정화 빔형성 기법

Roll, pitch로 인한 빔 특성 변화는 선저고정형 소나의 탐지 성능 저하를 발생시킨다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 ‘빔 안정화 빔형성 기법’을 제안한다. 이 기법은 roll, pitch로 인해 발생한 각 센서의 위치 변이를 산출하여 센서 수신신호의 위상 차이를 보상함으로써 빔 특성 변화와 이로 인한 탐지 성능 저하를 극복할 수 있다.

가. 빔 안정화 빔형성 기법

제안된 빔 안정화 빔형성 알고리즘은 그림 8에서 회색으로 표시된 부분이다. 함 진로, roll, pitch 정보를 수신하여 빔 방향 벡터, 센서 위치 벡터를 계산하여 지연 맵을 생성하고, 이를 센서신호에 적용하여 위상을 보상한다. 보상된 센서신호와 빔별 센서 선택정보를 이용하여 합산함으로써 빔별 출력을 생성한다.



[그림 8] 빔 안정화 빔형성 기법

Roll, pitch 보상된 센서위치 벡터 Q는 식 (5)와 같다.

$$Q = RPS \tag{5}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$S = [S_x, S_y, S_z]^T$$

R은 roll 보상 벡터, α 는 roll의 크기, P는 pitch 보상 벡터, β 는 pitch의 크기, S는 보상 전 센서위치 벡터, S_x, S_y, S_z 는 센서의 x, y, z 좌표를 의미한다.

또한 진북을 기준으로 하여 탐지빔을 형성함으로써, 함 기동과 무관하게 표적이 동일한 빔에서 탐지 가능하도록 식 (6)과 같이 진북안정화를 수행하였다.

$$Y = NQ, O = NS \tag{6}$$

$$N = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Y는 roll, pitch 보상 및 진북 안정화된 센서위치 벡터, N은 진북안정화 벡터, Q는 roll, pitch 보상된 센서위치 벡터, O는 진북안정화만 수행한 센서위치 벡터이며, γ 는 함 방위이다.

빔-센서별 지연맵은 식 (7)과 같다.

$$\Delta t'_{k,i} = (\tau'_{\max} - \tau'_{k,i}) f_s N \tag{7}$$

$$\tau'_{\max} = \max(u_k \cdot Q_i / c), \tau'_{k,i} = u_k \cdot Q_i / c \tag{8}$$

τ'_{\max} 는 보상된 센서배열에서의 최대 지연이다.

빔 안정화 빔형성 기법이 적용된 빔출력은 식 (9)와 같다.

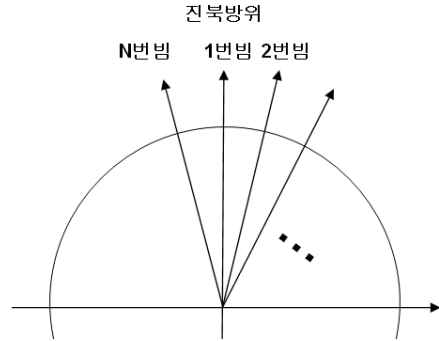
$$F_k = \sum_{i=1}^M w_i \times s_i(t + \Delta t'_{k,i}) \tag{9}$$

$s_i(t + \Delta t'_{k,i})$ 는 roll, pitch 보상된 센서신호, w_i 는 각

센서별 가중치이다.

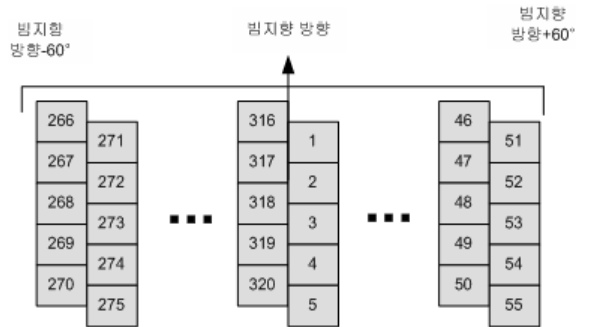
나. 빔 안정화 빔형성 기법의 적용

소나를 이용한 표적 탐지시, 진북을 기준으로 전 방향을 균등 분할하여 빔을 만들며, 빔 번호는 시계방향으로 차례로 부여하였다.



[그림 9] 방위에 따른 빔 번호 부여

센서번호는 선수방향의 센서를 1번으로 하여 시계방향으로 부여하였으며, 예로서 함 진로가 진북을 향하고 있을 경우의 센서선택을 그림 10에 나타내었다.

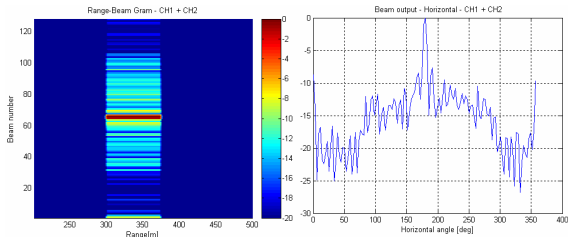


[그림 10] 빔 방위별 센서선택

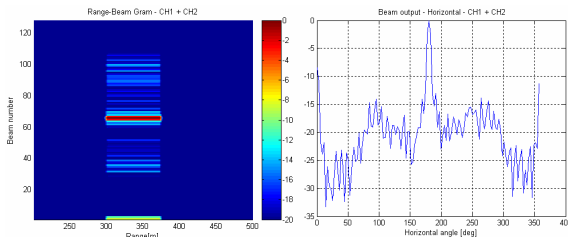
빔 안정화 빔형성 기법 적용 전/후의 탐지 성능 비교를 위하여 함 진로 60°, roll -11°, pitch 7.5°, 펄스 길이 50msec를 갖는 CW(Continuous Wave) 신호를 생성하였으며, 표적의 방위는 진북기준 180°, 거리는 300m로 설정하였다.

제안된 기법의 성능 분석을 위하여 빔 안정화 빔형성 기법 적용 전/후의 빔-거리 그래프와 표적거리에서

의 수평 빔출력을 비교 분석하였다. 빔-거리 그래프에서의 출력은 각 빔의 출력데이터를 75% 중첩하여 128-FFT 수행하여 전대역의 에너지를 합산하여 나타내었으며, 표적 거리에서의 각 빔의 출력을 통하여 수평 빔출력을 분석하였다.

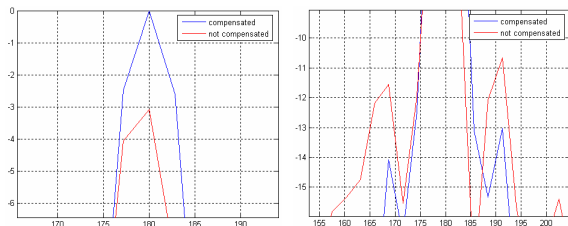


[그림 11] 빔 안정화 빔형성기법 적용 전
(좌) 빔-거리 그래프 (우) 표적거리에서의 수평빔출력



[그림 12] 빔 안정화 빔형성기법 적용 후
(좌) 빔-거리 그래프 (우) 표적거리에서의 수평빔출력

그림 11은 빔 안정화 빔형성 기법 적용전의 빔-거리 그래프와 수평 빔출력 패턴을, 그림 12는 빔 안정화 빔형성 기법 적용후의 빔-거리 그래프와 수평 빔출력 패턴을 나타낸다.



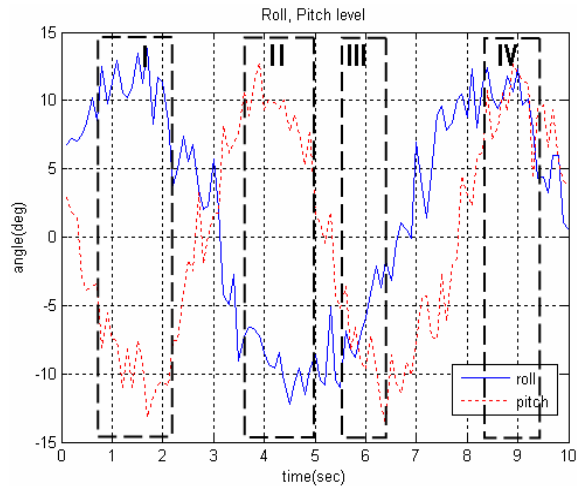
[그림 13] (좌) 지향방위 확대 (우) 부엽 확대

제안된 기법의 성능분석을 위해, 지향방위와 부엽을 확대하여 그림 13에 나타내었다. 제안된 ‘빔 안정화

빔형성 기법’의 적용을 통해 지향방위에서 3dB의 신호증대 효과를, 부엽에서 2.5dB의 신호감소 효과를 얻을 수 있었다.

4. 모의 데이터를 이용한 성능비교

상세한 성능비교를 위해, 다양한 값의 roll, pitch 및 표적방위를 갖는 모의 데이터가 요구된다. 모의 신호의 roll, pitch는 각각 7초, 5초 주기를 갖는 사인 함수에 -10dB의 백색화 잡음을 더하여 0.1초마다 생성하였으며, roll, pitch의 절대값의 큰 경우에 대하여 4개의 구역을 설정하였다.



[그림 14] 시간에 따른 roll, pitch 변화

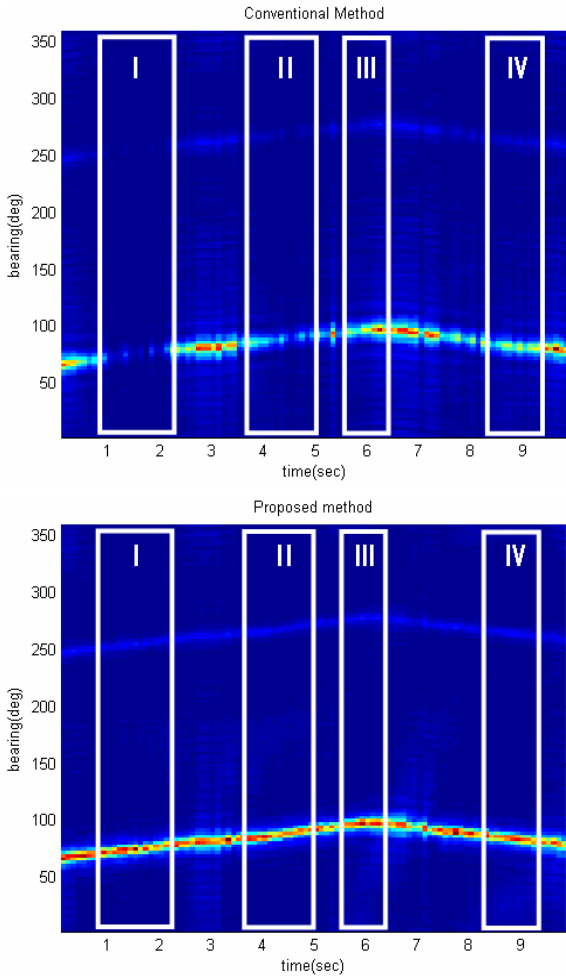
그리고 표적방위는 60°에서 90°로 증가 후 70°로 감소하도록 0.1초마다 설정하였다. 모의 신호는 이와 같이 설정된 roll, pitch 및 표적방위를 적용하여 각 센서별로 생성하였다.

제안된 빔 안정화 빔형성 기법의 성능을 검증하기 위하여, 방위-시간그래프(BTR : Bearing-Time Record), 실제 표적방위와의 오차, 표적 방위 신호크기에 대하여 기법 적용 전/후에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

각 방위별 에너지를 0.1초마다 산출한 방위-시간 그래프(BTR)를 그림 15에 나타내었으며, 그림 16에 실제

표적방위와 기존의 빔형성 기법 및 제안된 빔형성 기법을 통해 탐지된 표적방위 간의 오차를, 그림 17에서는 표적방위의 신호크기를 비교하였다.

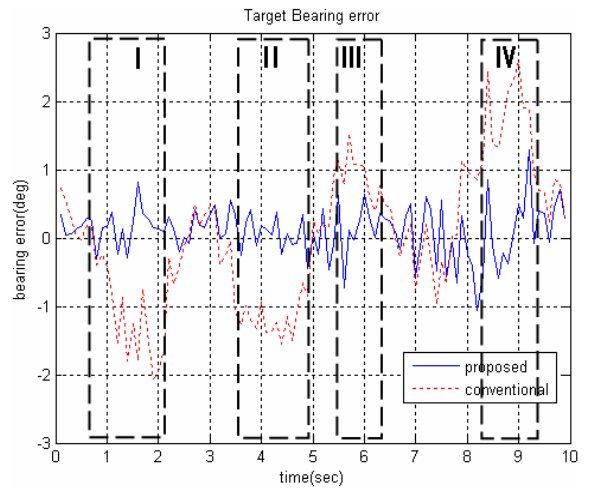
된 네 구간에서 1°에서 2°이상으로 크게 나타나는 반면, 제안된 기법을 적용하면 방위 오차가 평균 0.39°로 67%정도 감소된 안정적인 표적탐지가 가능하다.



[그림 15] (상) 제안된 기법 적용전의 방위-시간 그래프
(하) 제안된 기법 적용후의 방위-시간 그래프

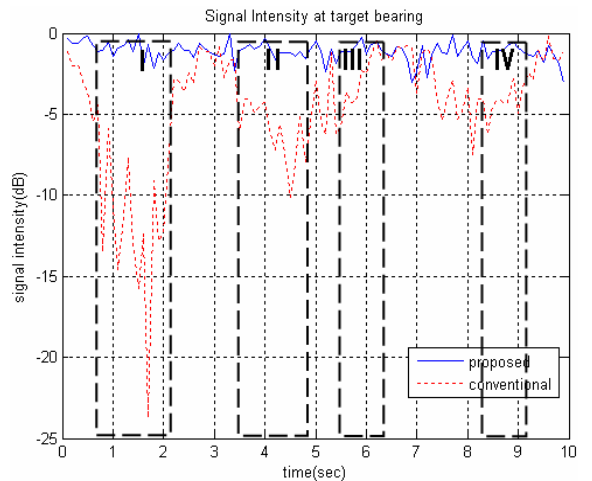
그림 15의 방위-시간 그래프에서 보듯이, 함정의 roll, pitch를 보상하지 않을 경우 roll, pitch가 작은 구간 구역에서는 성능 저하가 크지 않지만, 상대적으로 roll, pitch가 큰 4개 구역(I, II, III, IV)에서는 신호강도가 낮게 나타난다.

그림 16에서 실제 표적방위와 탐지된 표적방위 간의 오차를 살펴보면, 기존의 빔형성 기법의 경우 설정



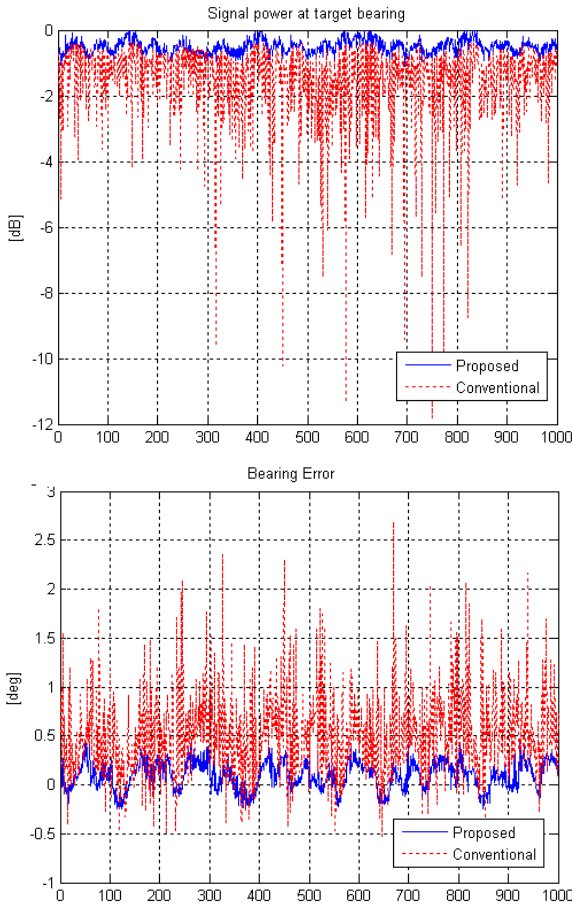
[그림 16] 실제 표적방위와의 오차 비교

표적 방위의 신호크기도 기존의 빔형성 기법의 경우 설정된 전체 평균은 -4.7dB로 신호크기가 감소되며, 특히 설정된 4개 구역의 평균은 -6.7dB로 전체 평균에 비해서도 2dB 감소된다. 한편 제안된 기법을 적용할 경우, 4개 구역평균은 -1.1dB이며, 전체 평균인 -1.0dB와도 차이가 없음을 확인할 수 있다.



[그림 17] 표적방위 신호크기 비교

제안된 기법의 일반적인 성능비교를 위하여 1000개의 [roll, pitch] 조합에 대해 반복 시뮬레이션하여 제안된 기법 적용전과 적용후의 탐지 방위오차 평균과 분산을 구하여 성능을 비교하였다. Roll, pitch는 빔 안정화 빔형성 기법의 성능을 확인하기 위하여 평균 5°, 분산 10°의 가우시안 분포를 갖도록 생성하였다.



[그림 18] (상) 표적방위 신호강도 (하) 표적방위 오차

제안된 기법을 통하여 표적의 방위오차는 평균 0.39°, 방위오차의 분산은 0.15° 감소 효과를 얻을 수 있었다. 또한 알고리즘 적용전 표적방위의 신호크기에 비하여 평균 1.03dB의 신호크기 증대효과를 얻었으며 제안된 기법을 통하여 높은 해상상태 또는 불안정한 함기동 조건하에서도 안정적인 표적 탐지가 가능함을 확인하였다.

[표 3] 빔 안정화 빔형성 기법 적용 전/후의 성능비교

	적용 전	적용 후
오차 평균(RMS)	0.53°	0.14°
오차 분산(σ^2)	0.16°	0.01°
표적방위신호 평균크기	-1.54dB	-0.51dB

5. 맺음말

본 논문에서는 원통형 배열 선저고정형 소나의 성능향상을 위하여 빔 안정화 빔형성 기법을 제안하였다. 기존의 빔형성 기법은 높은 해상상태 및 함정의 기동으로 인해 발생한 roll, pitch로 인하여 지향방위 신호크기의 감소 및 지향방위 변동과 같은 탐지성능 저하 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 roll, pitch로 인한 센서의 위치 변이를 시간지연을 통해 보상하는 ‘빔 안정화 빔형성 기법’을 제안하였다. 제안된 기법의 탐지 성능 향상 정도를 확인하기 위하여 기법 적용 전/후의 수평/수직 빔폭, 부엽준위, 표적방위 신호크기 등을 비교 분석하였으며, roll, pitch, 표적방위를 고려한 모의데이터를 생성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 제안된 기법을 통하여 표적의 방위정확도 84% 개선 및 표적방위 신호크기 1.03dB 증가 효과를 확인하였으며, 이는 선저고정형 소나의 안정적인 표적탐지에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Fan H. and Hu. X, “Tracking of Conventional Beamforming with Hydrophone Array of Varying Geometry”, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Volume 28, Issue 2, pp. 335~354, April 1992.

[2] P. Felisberto, S. M. Jesus, “Towed-array Beamforming during Ship’s Manoeuvring”, Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceed-

- ings, Volume 143, Issue 3, pp. 210~215, June 1996.
- [3] Randy L. Haupt, "Experimental Adaptive Cylindrical Array", Aerospace Conference, 1999. Proceedings. 1999 IEEE, Volume 3, pp. 291 ~ 296, Mar. 1999.
- [4] Tawfik. A. and Stergiopoulos. A., "A generic processing structure decomposing the beam-forming process of 2-D and 3-D arrays of sensors into sub-sets of coherent processes", Electrical and Computer Engineering, 1997. IEEE Canadian Conference on Volume 2, pp. 560~563, May 1997.
- [5] Sureau, J.-C. and Keeping, K., "Sidelobe control in cylindrical arrays", Antennas and Propagation, IEEE Transactions on [legacy, pre - 1988], Volume 30, Issue 5, pp. 1027~1031, 1988.
- [6] Jan Egil Kirkebø, "Layout-optimized Cylindrical Sonar Arrays", OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, Volume 2, pp. 598~602, Nov. 2004.